

6

Determinação de Esforços em Dutos Usando Resultados da Técnica do Furo Cego (Método ASTM E 837)

6.1. O Problema

Uma avaliação de Integridade Estrutural em dutos precisa conhecer as tensões a que estes estão sendo submetidos. As tensões medidas através do método do furo cego são resultados de estados de tensões complexos¹ causados: 1) pelos esforços de trabalho; 2) pelas condições de montagem e interação com o solo; e 3) pelas tensões residuais existentes no tubo, causadas pelo processo de fabricação. Uma análise pontual não é suficiente para determinar se o tubo está trabalhando de forma crítica ou segura, já que as tensões residuais, mesmo sendo altas, são autoequilibrantes. Existe então a necessidade de: medir mais de um ponto na seção; conhecer as situações que inspiram maiores cuidados no que diz respeito à seção do tubo; e, quando possível, separar as tensões provocadas pelas três parcelas acima citadas.

6.2. Situações Críticas com Relação às Tensões em uma Seção

A superposição das tensões residuais já existentes às tensões de serviço pode gerar diferentes distribuições de tensões na seção de uma peça. Serão expostas neste item três situações de distribuições de tensões em uma seção de um componente qualquer² que terão seus níveis de criticidade discutidos.

¹ A superposição de carregamentos pode gerar plasticidade no ponto em consideração e, neste caso, os estados de tensões não podem ser superpostos para fins de análise.

² Para facilitar a visualização, a representação será feita por uma placa de seção retangular. Imagine-se as distribuições colocadas, na superfície da seção transversal de um tubo.

6.2.1. Estado Autoequilibrante

A situação mostrada na figura 6.1 seria crítica para um componente submetido a carregamentos cíclicos, onde uma falha por fadiga inicia-se em pontos das superfícies sob tensões trativas. Mas, para carregamentos estáticos (caso normal dos dutos), a falha por escoamento pode não ocorrer, caso as altas tensões se restrinjam a pequenas regiões e os esforços que as estão gerando sejam equilibrados por aqueles que geram tensões de sentido contrário e que atuam ao longo do restante da seção. Então, para dutos, a situação mostrada na figura 6.1 não precisa ser encarada com tanta preocupação. Por exemplo, nas soldas longitudinais de tubos é comum a presença de tensões residuais trativas com valores próximos ao S_y , e nem por isto ele estaria prestes a sofrer uma falha por escoamento.

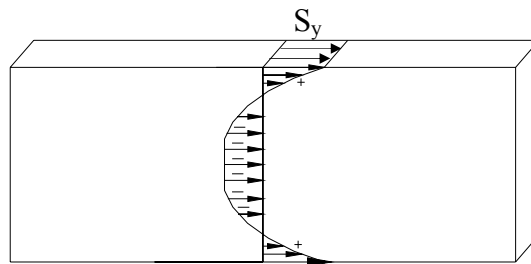


Figura 6.1. Perfil de tensões auto-equilibrantes: a tração nas extremidades é equilibrada por tensões compressivas no restante da seção

6.2.2. Tensão Trativa Uniforme em Toda a Seção

Supondo que as medições de tensões longitudinais superficiais, ao longo da seção transversal do componente, resultem em uma distribuição como a representada pela figura 6.2, o caso deve ser encarado como crítico. O equipamento estaria na iminência de uma falha por escoamento e teria que ter suas cargas de serviço reduzidas imediatamente para uma avaliação mais detalhada.

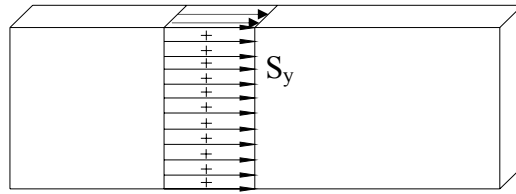


Figura 6.2. Tensões superficiais trativas em toda a seção.

Em perfis de distribuições de tensões similares ao da figura 6.2, as tensões de maior influência são devidas aos esforços axiais e a situação torna-se crítica e próxima das condições de formação de um colapso plástico por esforço trativo. Esta é uma situação possível quando existem variações de temperaturas extremas entre dutos e solos ou movimentos destes.

6.2.3. Tensões Altas e de Sinais Contrários em Pontos Simétricos da Seção.

No caso da figura 6.3, o esforço normal é nulo. No entanto, o caso da figura 6.3a pode evoluir para os casos de plastificação 6.3b e alcançar o caso 6.3c, onde se tem o chamado momento último, no qual o componente sofre um colapso plástico. Em um tubo, o aumento progressivo das tensões de flexão provocará uma ovalização antes que ocorra o colapso plástico. A ovalização provoca tensões circunferenciais altas que, somadas à tensão gerada pela pressão interna, poderá levar o tubo à ruptura.

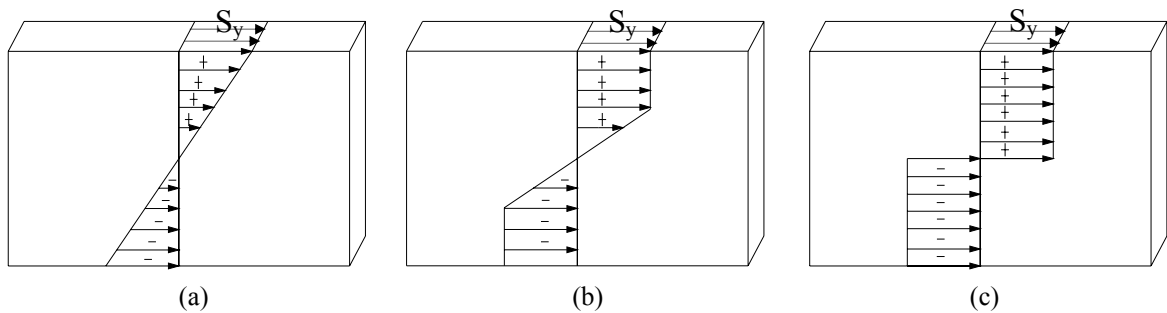


Figura 6.3. Perfil de tensão de um corpo sujeito à flexão: (a) no limite elástico, (b) plastificado e (c) no momento último.

6.3. Matrizes para Separação dos Esforços

A seção 6.2 permite concluir que é importante a separação das tensões geradas pelos esforços externos e pela pressão de operação das tensões residuais para que se possa fazer a previsão e prevenção de uma falha estrutural. As tensões geradas um duto são causadas pelos seguintes carregamentos: pressão interna, temperatura, esforço axial e momento fletor causados por montagem e/ou movimento de solo (figura 6.4). O esforço axial e momentos fletores, que não sejam causados pela pressão, não estão atrelados à operação e, quando detectados, podem ser aliviados através da movimentação do duto para posições onde esses esforços sejam reduzidos ou anulados.

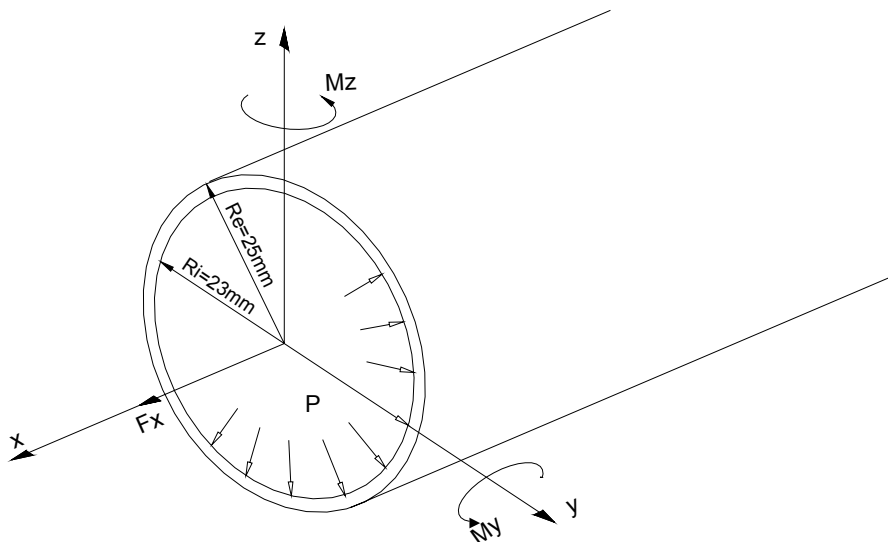


Figura 6.4. Dimensões e carregamento de um hipotético usado nas análises deste capítulo.

6.3.1. Tubo sem Tensões Residuais

Como já visto no capítulo 3, as informações obtidas com a técnica do furo cego são as tensões principais atuantes na superfície da estrutura medida. Para o caso de dutos essas tensões normalmente coincidem com as direções longitudinal e circunferencial.

A primeira situação colocada é a de um tubo isento de tensões residuais, o que dificilmente será encontrado em casos práticos. Entretanto, a análise desta situação é útil para iniciar a discussão sobre separação dos esforços causadores

das tensões medidas. Para os esforços da figura 6.4 as equações das tensões longitudinais e circunferenciais a serem determinadas nas medições com o furo cego são:

$$\sigma_{l_medida(i)} - \nu \frac{PD}{2t} = \frac{F_x}{A} + \frac{M_z}{w_z} \sin \alpha_i + \frac{M_y}{w_y} \cos \alpha_i = \frac{4F_x}{\pi(D^2 - d^2)} + \frac{32M_z \sin \alpha_i}{\pi(D^3 - d^3)} + \frac{32M_y \cos \alpha_i}{\pi(D^3 - d^3)}$$

$$\sigma_{c_medida(i)} = \frac{PD}{2t}$$

(6.1) a-b

O termo $\nu \frac{PD}{2t}$, que aparece na equação 6.1(a) é referente à restrição que o solo impõe sobre os deslocamentos axiais, fazendo com que as deformações longitudinais sejam nulas em dutos enterrados. Quando a região desenterrada para realização da medição é pequena, esta hipótese continua sendo válida [40, 41, 42, 43, 44] e tem-se:

$$\varepsilon_l = \frac{1}{E}(\sigma_l - \nu \sigma_c) = 0 \Rightarrow \sigma_l = \nu \sigma_c = \nu \frac{PD}{2t} \quad (6.2)$$

Para grandes regiões desenterradas, a hipótese $\varepsilon_l = 0$ deixa de ser válida.

Com base nas equações 6.1, é necessário o conhecimento de tensões longitudinais em pelo menos três pontos para a determinação de F_x , M_z e M_y e uma de tensão circunferencial, para determinação de P^{*3} . Estas quatro informações deverão ser obtidas de no mínimo três rosetas, que deverão ser coladas para realização da técnica do furo cego. Sendo assim, as matrizes a serem utilizadas para determinação dos esforços F_x , M_z , M_y e P , sendo α_i as posições circunferenciais das rosetas de medição, são:

³ * A consideração de que a tensão circunferencial só tem influência da pressão interna só é válida para casos onde as tensões de flexão não são suficientes para ovalizar o tubo. A ovalização pode provocar tensões circunferenciais altas.

Conjunto de Matrizes A

$$[F] = \begin{bmatrix} F_x \\ M_z \\ M_y \\ P \end{bmatrix}, [\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_{llida(1)} - \nu \frac{PD}{2t} \\ \sigma_{clida(1)} \\ \sigma_{llida(2)} - \nu \frac{PD}{2t} \\ \sigma_{clida(2)} \\ \sigma_{llida(3)} - \nu \frac{PD}{2t} \\ \sigma_{clida(3)} \end{bmatrix} \text{ e } [K] = \begin{bmatrix} \frac{4}{\pi(D^2 - d^2)} & \frac{32 \sin \alpha_1}{\pi(D^3 - d^3)} & \frac{32 \cos \alpha_1}{\pi(D^3 - d^3)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{D}{2t} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{4}{\pi(D^2 - d^2)} & \frac{32 \sin \alpha_3}{\pi(D^3 - d^3)} & \frac{32 \cos \alpha_3}{\pi(D^3 - d^3)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{D}{2t} \end{bmatrix}$$

Sendo:

$$[\sigma] = [K][F] \quad (6.3)$$

A solução do sistema sobre-determinístico (6.2) através do método de mínimos quadrados [28] leva a:

$$[K]^T [\sigma] = [K]^T [K][F]$$

resultando em:

$$[F]_{(4 \times 1)} = \left[\left([K]_{(4 \times 6)}^T [K]_{(6 \times 4)} \right)_{4 \times 4}^{-1} \left([K]_{(4 \times 6)}^T [\sigma]_{(6 \times 1)} \right)_{(4 \times 1)} \right]_{(4 \times 1)} \quad (6.4)$$

Foram feitas rotinas no software MatLab 7.0 para resolver os sistemas matriciais deste capítulo. Nestas rotinas, entra-se com os valores de tensões determinados através do método do furo cego, com as posições das rosetas e com as dimensões do tubo. O programa calcula os esforços F_x , M_z , M_y e P .

6.3.2. Tubo com Tensões Residuais

Em um tubo com tensões residuais, o critério de determinação do número mínimo de medições necessárias não depende somente do número de esforços, mas também da complexidade da distribuição das tensões residuais existentes. As

matrizes utilizadas neste caso serão expostas no tópico de recomendações de medição, onde será apresentado o tratamento para as curvas de tensões residuais encontradas no capítulo 5.

6.4. Recomendações de Medição

Com base nos resultados apresentados no capítulo 5 e com as informações dos tópicos anteriores, serão dadas algumas sugestões para execução de medições de tensões atuantes em dutos e serão fornecidas algumas metodologias para determinação de esforços, separando-os das tensões residuais de fabricação existentes.

Já como primeira recomendação, a partir das medições laboratoriais realizadas neste trabalho, sugere-se que as medições sejam realizadas em pontos fora da região compreendida entre $[-22,5^\circ \text{ e } 22,5^\circ]$ em relação à solda, pois a variação de tensões residuais nesta região mostrou-se bastante brusca, sendo que, pequenos desvios da posição de medição podem gerar resultados muito diferentes para as tensões existentes no ponto estabelecido.

As outras recomendações serão feitas a partir dos seguintes parâmetros: complexidade das curvas de tensões residuais encontradas nas medições, esforços que se desejam avaliar e, obviamente, o nível de qualidade esperado dos resultados obtidos.

Foram propostos e serão descritos a seguir, dois procedimentos para separar as tensões residuais das tensões atuantes nos dutos, visando uma maior correção na determinação dos esforços de trabalho. Estas metodologias são específicas para as curvas de tensões residuais encontradas nas medições deste trabalho. Portanto, elas devem ser encaradas como idéias de tratamentos para as curvas a serem encontradas para outros tubos. Elas não têm a pretensão de serem úteis para qualquer tubo, a não ser para os de mesmas propriedades e dimensões dos tubos analisados neste trabalho.

O primeiro procedimento trata as tensões residuais existentes como uma faixa de incerteza dentro das tensões totais medidas.

O segundo procedimento propõe o estabelecimento de uma relação entre as tensões residuais circunferenciais e as longitudinais. Determinada esta relação, as tensões residuais longitudinais poderão ser determinadas a partir das tensões

circunferenciais que serão conhecidas através da subtração da tensão devida à pressão (que é uma informação conhecida) das tensões circunferenciais totais medidas.

Os métodos propostos partem da hipótese de que as tensões residuais têm uma variação suave ao longo do comprimento do tubo - como foi observado nas medições realizadas neste trabalho e corroborado pelas medições de Oliveira e Lamy [23] (capítulo 1) - e que suas curvas mantêm, pelo menos, o mesmo comportamento em diferentes seções transversais do tubo.

6.4.1. Representação das Tensões Residuais por uma Margem de Incerteza nas Medições em Campo

Esta opção só é interessante para o caso de tubos com baixas tensões residuais de fabricação⁴, para que a incerteza na determinação dos esforços medidos seja aceitável. O tubo API 5L X60, analisado por curvas formadas pelas médias das tensões residuais medidas com os métodos do furo cego e do furo elíptico (pontos do gráfico da figura 6.5), poderia ter o seu cálculo de esforços realizado com esse artifício.

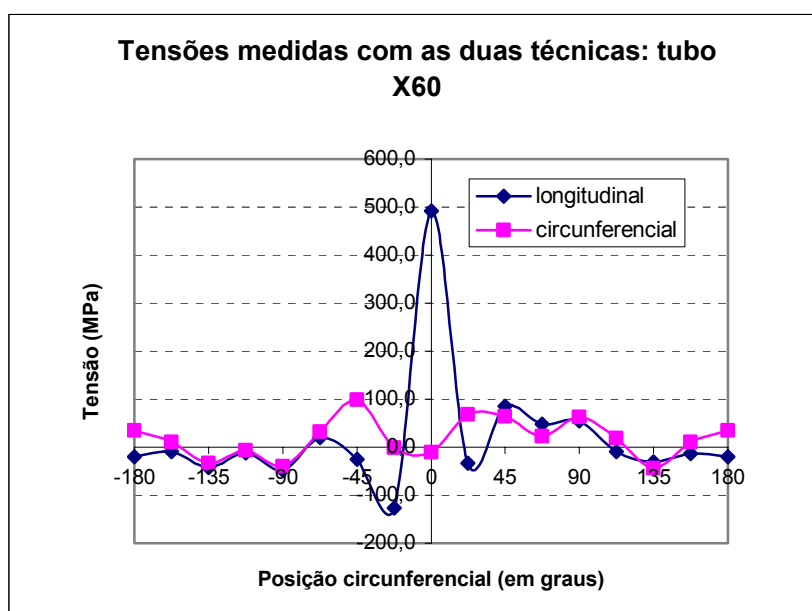


Figura 6.5. Curvas das médias entre as tensões medidas com as técnicas dos furos cego e elíptico para o tubo X60

⁴ Caso dos tubos sem costura, nos quais todo o processo de fabricação é feito a quente.

Para este tubo, os valores absolutos das curvas de tensões longitudinais e circunferenciais, no domínio $[112,5^\circ, 180^\circ]$ e $[-67,5^\circ, -180^\circ]$, estão dentro de uma faixa de $\pm 10\%$ da resistência ao escoamento (S_y) do tubo, que é de 420 MPa. O número mínimo de medições necessário para determinação dos esforços de trabalho em campo com esse procedimento será de três e as matrizes utilizadas serão:

Conjunto de Matrizes B

$$[F] = \begin{bmatrix} F_x \\ M_z \\ M_y \\ P \end{bmatrix}, [\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_{l_medida(1)} - \nu \frac{PD}{2t} \pm 0,1S_y \\ \sigma_{c_medida(1)} \pm 0,1S_y \\ \sigma_{l_medida(2)} - \nu \frac{PD}{2t} \pm 0,1S_y \\ \sigma_{c_medida(2)} \pm 0,1S_y \\ \sigma_{l_medida(3)} - \nu \frac{PD}{2t} \pm 0,1S_y \\ \sigma_{c_medida(3)} \pm 0,1S_y \end{bmatrix} \text{ e } [K] = \begin{bmatrix} \frac{4}{\pi(D^2 - d^2)} & \frac{32\sin\alpha_1}{\pi(D^3 - d^3)} & \frac{32\cos\alpha_1}{\pi(D^3 - d^3)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{D}{2t} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{4}{\pi(D^2 - d^2)} & \frac{32\sin\alpha_3}{\pi(D^3 - d^3)} & \frac{32\cos\alpha_3}{\pi(D^3 - d^3)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{D}{2t} \end{bmatrix}$$

Através de uma análise combinatória variando as linhas onde se soma ou subtrai o valor $0,1S_y$ na matriz σ , chega-se a vários valores para os esforços. Analisa-se a variação dos esforços e, ao final, adotam-se os maiores valores obtidos para estes, primando pela segurança da operação, ou a média dos valores obtidos.

As curvas de tensões residuais dos tubos, bem como, os resultados dos esforços a serem determinados em campo, serão tão mais confiáveis, quanto maior for o número de informações de tensões residuais obtidos em laboratório. Neste caso especificamente, um número grande de medições daria uma melhor garantia da verdadeira faixa de variação de tensões nas regiões de medição.

- Demonstração da aplicação do procedimento 6.4.1. Por exemplo, para três medições, para determinar F_x , M_z e M_y faz-se:

$$[F_{(I)}] = \begin{bmatrix} F_{x(I)} \\ M_{z(I)} \\ M_{y(I)} \end{bmatrix} = [K]^{-1} \begin{bmatrix} \sigma_{l_medida}(\alpha_1) + 0,1S_y \\ \sigma_{l_medida}(\alpha_2) + 0,1S_y \\ \sigma_{l_medida}(\alpha_3) + 0,1S_y \end{bmatrix};$$

$$[F_{(II)}] = \begin{bmatrix} F_{x(II)} \\ M_{z(II)} \\ M_{y(II)} \end{bmatrix} = [K]^{-1} \begin{bmatrix} \sigma_{l_medida}(\alpha_1) + 0,1S_y \\ \sigma_{l_medida}(\alpha_2) - 0,1S_y \\ \sigma_{l_medida}(\alpha_3) - 0,1S_y \end{bmatrix},$$

e sucessivamente, até as que se completem as oito combinações possíveis. Dos oito valores obtidos para F_x , M_z e M_y , extraídos dos vetores $F_{(I,..., VIII)}$, calculam-se os valores médios e determinam-se os máximos suas variâncias.

6.4.2. Estabelecimento de uma Relação Entre as Tensões Residuais Longitudinais e Circunferenciais

A tensão circunferencial total medida em um duto é a soma da tensão devida à pressão e da tensão residual circunferencial existente no trecho medido (tubos sem ovalização). A pressão atuante no duto é rigorosamente controlada e, portanto será sempre um dado conhecido. Consequentemente, a tensão residual circunferencial também pode ser determinada diretamente com a medição. Já a tensão longitudinal atuante depende de outros esforços que não são monitorados pela operação, o que torna a determinação da parcela das tensões residuais mais complicada nessa direção. Portanto, o estabelecimento de uma relação entre os valores pontuais de tensões residuais circunferenciais e longitudinais do tubo, pode ser uma boa opção para a determinação das tensões residuais longitudinais existentes no tubo. Analisando o gráfico resultante das medições no tubo X46 (figura 5.16), nota-se uma razoável relação entre as duas curvas para boa parte do domínio, principalmente nos pontos 90°, -135° e -180°. Tratando as tensões residuais longitudinais como uma faixa entre 60 e 70% das circunferenciais (relação estabelecida entre as curvas) e usando os pontos indicados para a realização das medições, as matrizes para separação dos esforços, assumem as seguintes formas:

Conjunto de Matrizes C

$$[F] = \begin{bmatrix} F_x \\ M_z \\ M_y \\ P \end{bmatrix}, [\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_{1_medida(1)} - \nu \frac{PD}{2t} - (0,6 \text{ ou } 0,7) \cdot \sigma_{rc} \\ \sigma_{c_medida(1)} - \sigma_{rc} \\ \sigma_{1_medida(2)} - \nu \frac{PD}{2t} - (0,6 \text{ ou } 0,7) \cdot \sigma_{rc} \\ \sigma_{c_medida(2)} - \sigma_{rc} \\ \sigma_{1_medida(3)} - \nu \frac{PD}{2t} - (0,6 \text{ ou } 0,7) \cdot \sigma_{rc} \\ \sigma_{c_medida(3)} - \sigma_{rc} \end{bmatrix} \text{ e } [K] = \begin{bmatrix} \frac{4}{\pi(D^2 - d^2)} & \frac{32 \sin \alpha_1}{\pi(D^3 - d^3)} & \frac{32 \cos \alpha_1}{\pi(D^3 - d^3)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{D}{2t} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{4}{\pi(D^2 - d^2)} & \frac{32 \sin \alpha_3}{\pi(D^3 - d^3)} & \frac{32 \cos \alpha_3}{\pi(D^3 - d^3)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{D}{2t} \end{bmatrix}$$

Faz-se uma análise semelhante à realizada no tópico 6.4.1, agora variando os termos a que se subtraem $0,6 \sigma_{rc}$ e $0,7 \sigma_{rc}$, para obter os valores dos esforços. Dependendo do grau de correlação entre as curvas, este método pode apresentar bons resultados para os esforços, com um baixo número de medições.

- Demonstração da aplicação do procedimento 6.4.2⁵. Por exemplo, para três medições, objetivando determinar apenas F_x , M_z e M_y , faz-se:

$$[F_{(I)}] = \begin{bmatrix} F_{x(I)} \\ M_{z(I)} \\ M_{y(I)} \end{bmatrix} = [K]^{-1} \begin{bmatrix} \sigma_{1_medida}(\alpha_1) - [0,6 \cdot (\sigma_{c_medida}(\alpha_1) - \frac{PD}{2t})] \\ \sigma_{1_medida}(\alpha_2) - [0,6 \cdot (\sigma_{c_medida}(\alpha_2) - \frac{PD}{2t})] \\ \sigma_{1_medida}(\alpha_3) - [0,6 \cdot (\sigma_{c_medida}(\alpha_3) - \frac{PD}{2t})] \end{bmatrix};$$

⁵ Os valores de “ $\sigma_{c_medida}(\alpha_i) - \frac{PD}{2t}$ ” correspondem às tensões residuais circunferenciais (σ_{rc}) existentes no tubo nas posições α_i .

$$[F_{(II)}] = \begin{bmatrix} F_{x(II)} \\ M_{z(II)} \\ M_{y(II)} \end{bmatrix} = [K]^{-1} \begin{bmatrix} \sigma_{l_medida}(\alpha_1) - [0,7 \cdot \left(\sigma_{c_medida}(\alpha_1) - \frac{PD}{2t} \right)] \\ \sigma_{l_medida}(\alpha_2) - [0,6 \cdot \left(\sigma_{c_medida}(\alpha_2) - \frac{PD}{2t} \right)] \\ \sigma_{l_medida}(\alpha_3) - [0,6 \cdot \left(\sigma_{c_medida}(\alpha_3) - \frac{PD}{2t} \right)] \end{bmatrix},$$

e sucessivamente, até as que se completem as oito combinações possíveis. Extraem-se das matrizes $F_{(I,...,VIII)}$, os valores máximos e médios de F_x , M_z e M_y .

Note-se que, as recomendações foram feitas tendo como principal base as curvas de tensões residuais ao longo da circunferência do tubo. E pode-se notar a clara diferença entre as curvas dos dois tubos analisados, apesar de terem sido obtidos pelo mesmo processo de fabricação (figuras 5.16 e 5.18). Por isso, para utilização em campo das recomendações feitas, é necessário que se meçam as tensões de fabricação em amostras dos tubos que serão usados na dutovia, para obter suas curvas. As medições realizadas podem ser representativas para tubos de mesmo material, processo de fabricação e mesmas dimensões.

É importante observar que, os procedimentos 6.4.1 e 6.4.2 trabalham sobre uma faixa de valores. Isto foi feito para levar em consideração as possíveis variações de tensões residuais de fabricação, mesmo em tubos de mesmas propriedades e dimensões, e submetidos a um mesmo processo de fabricação.

6.5. Simulações

Serão colocadas neste item, algumas situações hipotéticas de medições em tubos com a técnica do furo cego para testar a acurácia dos procedimentos descritos na seção 6.4. Todas as simulações feitas serão para um tubo enterrado ($\varepsilon_1 = 0$), com as dimensões dadas na figura 6.4, com um módulo de Young de 200 GPa e coeficiente de Poisson de 0,3. Os esforços a serem determinados são também os representados naquela figura. Os valores de tensões devidas aos esforços externos usados nesta simulação, bem como, as dimensões do tubo da

figura 6.4, poderiam ser quaisquer. Foram escolhidos $D = 50$ mm, $d=46$ mm e $t = 2$ mm para simular o tubo enterrado.

1º Caso: Tubo sem Tensões Residuais

A tabela 6.1 mostra as posições circunferenciais em relação à solda e os valores de tensões referentes a três medições simuladas no tubo. Este é o número mínimo de medições a serem realizadas em uma mesma seção para a determinação dos esforços axial, de flexão e de pressão. Observa-se que na ausência de tensões residuais, as tensões circunferenciais são provocadas apenas

pela pressão interna, desta forma faz-se $\frac{PD}{2t} = \sigma_{c_medida}$.

Tabela 6.1. Tensões lidas em medições hipotéticas para um tubo sem tensões residuais

Medição	Posição (rad.)	Longitudinais (MPa)	Circunferenciais (MPa)
1	90°	180	100
2	270°	280	100
3	180°	80	100

Substituindo as dimensões do tubo (matriz K) e os valores de tensões da tabela 6.1 no conjunto de matrizes A, tem-se:

$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_{l_medida} - \frac{\nu PD}{2t} = 150, \text{ sendo } \frac{PD}{2t} = \sigma_{c_medida}, \text{ já que } \sigma_{rc} = 0 \\ \sigma_{c_medida} = 100 \\ \sigma_{l_medida} - \frac{\nu PD}{2t} = 250 \\ \sigma_{c_medida} = 100 \\ \sigma_{l_medida} - \frac{\nu PD}{2t} = 50 \\ \sigma_{c_medida} = 100 \end{bmatrix} \text{ MPa}$$

$$[K] = \begin{bmatrix} 0,0033 \text{ mm}^2 & 2,8732 \times 10^{-4} \cdot \text{sen} \alpha_1 \text{ mm}^{-3} & 2,8732 \times 10^{-4} \cdot \text{cos} \alpha_1 \text{ mm}^{-3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 12,5 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0,0033 \text{ mm}^2 & 2,8732 \times 10^{-4} \cdot \text{sen} \alpha_3 \text{ mm}^{-3} & 2,8732 \times 10^{-4} \cdot \text{cos} \alpha_3 \text{ mm}^{-3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 12,5 \end{bmatrix}$$

Resolvendo o sistema dado pela equação 6.4, chega-se aos valores dos esforços:

$$\begin{bmatrix} F_x = 60 \text{ kN} \\ M_z = -174 \text{ kN.m} \\ M_y = 522 \text{ kN.m} \\ P = 8 \text{ MPa} \end{bmatrix}$$

Estes serão os valores a serem comparados com os resultados que serão encontrados nos demais casos apresentados a seguir. As tensões referentes a cada esforço são:

$$\sigma_{F_x} = \frac{4.F_x}{\pi(D^2 - d^2)} = 200 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{M_z} = \frac{32M_z.\text{sen}(\alpha_i)}{\pi(D^3 - d^3)} = -50.\text{sen}(\alpha_i) \text{ MPa}$$

$$\sigma_{M_y} = \frac{32M_y.\text{cos}(\alpha_i)}{\pi(D^3 - d^3)} = 150.\text{cos}(\alpha_i) \text{ MPa}$$

$$\sigma_P = \frac{PD}{2t} = 100 \text{ MPa}$$

2º Caso: Com Tensões Residuais Usando as curvas do Tubo X46

A tabela 6.2 mostra os valores das tensões devidos aos esforços encontrados no caso anterior somadas às tensões residuais do tubo API 5L X46 medidas. As posições de medição (α_i) estão indicadas na segunda coluna da tabela. As duas últimas colunas da tabela foram geradas tal como no exemplo mostrado a seguir. Considerou-se o tubo enterrado com ($\varepsilon_1 = 0$), então para a primeira linha da tabela tem-se:

$$\sigma_{l_medida}(\alpha_1) = \frac{F_x}{A} + \frac{32.M_z.\sin(22,5^\circ)}{\pi(D^3 - d^3)} + \frac{32.M_y.\cos(22,5^\circ)}{\pi(D^3 - d^3)} + \frac{\nu PD}{2t} + \sigma_{rl}(22,5^\circ) = 303,6 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{c_medida}(\alpha_1) = \frac{PD}{2t} + \sigma_{rc}(22,5^\circ) = 133,7 \text{ MPa}$$

sendo F_x , M_z , M_y e P os valores calculados no 1º caso. Assim foi feito para as demais linhas da tabela.

Tabela 6.2. Tensões obtidas em medições simuladas para um tubo com as curvas de tensões residuais do tubo X46.

Medição	Posição	Tensões Residuais (MPa)		Tensões Totais Medidas (MPa)	
		Longitudinal	Circunferencial	Longitudinal	Circunferencial
1	22,5°	-57,4	33,7	303,6	133,7
2	45°	43,4	125,4	344,1	225,4
3	90°	170,1	240,0	350,1	340
4	135°	174,5	188,3	263,1	288,3
5	180°	146,4	219,9	226,4	319,9
6	-135°	188,0	313,5	347,3	413,5
7	-90°	24,9	148,8	304,9	248,8
8	-45°	-53,4	55,1	318	155,1
9	-22,5°	-68,9	64,5	318,8	164,5

➤ **Solução usando uma relação entre as curvas de tensões residuais longitudinais e circunferenciais**

Analisando o gráfico da figura 5.16, observa-se que as posições 180° (equivalente a -180°), -135° e 90° seguem bem a relação entre as tensões residuais longitudinais e circunferenciais estabelecida para estas curvas no tópico 6.4.2, que foi de $\sigma_{rl} = [0,6\sigma_{rc}; 0,7\sigma_{rc}]$. Como três é o número de medições mínimo necessário para determinação dos esforços desejados, serão adotados os valores da coluna de tensões medidas para estes três pontos, grifados na tabela 6.2. Para este caso, a pressão já teria que ser pré-determinada pela operação, o que é feito normalmente. Será usado o valor de pressão determinado no 1º caso, isto é $P = 8 \text{ MPa}$.

Resolvendo os sistemas constituídos pelas matrizes do Conjunto C, os máximos valores absolutos encontrados para os momentos e esforço axial foram:

$$\begin{aligned}F_x &= 76 \text{ kN} \\M_z &= -190 \text{ kN.m} \\M_y &= 631 \text{ kN.m}\end{aligned}$$

E os valores médios calculados foram:

$$\begin{aligned}F_x &= 61 \text{ kN} \\M_z &= -96 \text{ kN.m} \\M_y &= 481 \text{ kN.m}\end{aligned}$$

➤ **Solução ignorando a existência de tensões residuais**

Esta é a alternativa utilizada na maior parte das vezes onde simplesmente desconsidera-se a parcela de tensões residuais nos valores de tensões medidos tendo como justificativa o desconhecimento de seus valores e comportamentos.

Usando o conjunto de matrizes A, agora para os nove valores de tensões longitudinais medidas apresentados na tabela 6.2, e usando o método de mínimos quadrados, encontram-se:

$$\begin{aligned}F_x &= 83 \text{ kN} \\M_z &= 0,9 \text{ kN.m} \\M_y &= 92 \text{ kN.m}\end{aligned}$$

Para averiguar se, com medições em um número de pontos consegue-se aproximar dos valores reais dos esforços mesmo ignorando a existência das tensões residuais no tubo, foi feito o cálculo dos esforços usando-se 16 pontos de medição (número aleatório, mas alto para medições em campo)⁶. Os resultados encontrados usando o método de mínimos quadrados foram:

⁶ Os valores de tensões residuais longitudinais para os pontos usados foram extraídos da “spline” traçada entre os pontos de tensões residuais medidas do gráfico 5.16 (linha cheia do gráfico). A estes valores foram somadas as tensões correspondentes aos esforços nos respectivos pontos para que se obtivessem os valores de tensões longitudinais medidas nesta simulação, tais como, os da tabela 6.2.

$$F_x = 84 \text{ kN}$$

$$M_z = 9 \text{ kN.m}$$

$$M_y = 111 \text{ kN.m}$$

❖ Comparação Entre os Métodos (X46)

A tabela 6.3 apresenta uma análise comparativa, apontando os erros de cada método na determinação dos momentos fletores e do esforço axial em relação aos resultados exatos indicados no 1.º caso. Os valores de pressão não serão colocados, pois como já foi dito, é um esforço conhecido e será sempre uma informação fornecida pela operação.

Tabela 6.3. Comparação entre os erros obtidos para os diferentes métodos de determinação de esforços em relação aos valores exatos para o tubo X46

Método	F_x (kN)	M_z (kN.m)	M_y (kN.m)
	Erro ⁷	Erro	Erro
Simulado sem T.R.'s	60	-174	522
	0%	0%	0%
Ignorando a existência das T.R.'s (Com 9 pontos)	83	0,9	92
	38%	-99%	-82%
Ignorando a existência das T.R.'s (Com 16 pontos medidos)	84	9	111
	39%	-95%	-79%
Relação entre as curvas de T.R.'s (Valores Máximos)	76	-190	631
	27%	9%	21%
Relação entre as curvas de T.R.'s (Valores Médios)	61	-96	481
	2%	-45%	-8%

Ignorando-se a existência das tensões residuais, dentre os valores obtidos para nove medições, o menor erro foi encontrado para o esforço axial. Os erros na determinação dos esforços de flexão foram grosseiros e os dois maiores erros foram para menos, o que é ainda pior em termos de segurança operacional. Isto mostra o quão erráticas podem ser as análises de determinação de esforços, quando se ignora a existência das tensões residuais.

Com dezesseis medições, os erros cresceram para F_x e M_z e continuou muito grande para M_y , ou seja, não houve melhoras nos resultados mesmo com o aumento do número de pontos medidos.

⁷ Erro (%) = $\frac{\text{Valor}_{(\text{Método})} - \text{Valor}_{(\text{Exato})}}{\text{Valor}_{(\text{Exato})}} \times 100$

Para o método que relaciona as curvas de tensões residuais longitudinais e circunferenciais, tem-se:

- Quando usados os valores máximos, o maior erro encontrado foi para F_x (27%). Os resultados encontrados para os dois outros esforços apresentaram erros de 9 e 20% para M_z e M_y , respectivamente.

- Usando os valores médios, pode-se considerar que apenas o valor do esforço axial foi melhor do que o encontrado com os valores máximos. O valor de M_z apresentou um erro bem alto, de -45%, o M_y apresentou um erro baixo (-8%), mas também para menos.

- O método também foi testado com cinco pontos (incluíram-se mais dois pontos de medições simuladas entre -135° e -180°). Para os valores máximos foram encontrados valores melhores para F_x (encontrou-se 70 kN) e para M_y (610 kN.m). Para os valores médios houve uma melhora em M_z (encontrou-se -116 kN.m).

O método de relação entre as curvas de tensões residuais longitudinais e circunferenciais, no geral, forneceu bons resultados para os esforços máximos e com erros sempre para mais. Sabe-se que, o interesse principal na análise de integridade estrutural é determinar e achar soluções para as situações críticas de carregamento, para garantir a segurança de operação. Então, usando-se os valores máximos dos esforços, estar-se-á realizando uma análise segura, ainda que, por vezes, conservadora.

Já os erros encontrados na metodologia que ignora as tensões residuais, além de muito maiores do que os encontrados com o método de relação entre as curvas, foram para menos, o que pode levar a análises que comprometam a segurança de operação.

3º Caso: Com Tensões Residuais Usando as curvas do Tubo X60

A tabela 6.4 é uma adaptação da tabela 6.2 aos valores de medições hipotéticas de tensões totais atuando no tubo X60. Este tubo tem suas tensões residuais representadas pelos gráficos da figura 6.5.

Tabela 6.4. Tensões obtidas em medições simuladas para um tubo com as curvas de tensões residuais do tubo X60.

Medição	Posição	Tensões Residuais (MPa)		Tensões Totais Medidas (MPa)*	
		Longitudinal	Circunferencial	Longitudinal	Circunferencial
1	45°	85,2	64,5	267,4	168,4
2	67,5°	48,3	22,4	326,4	164,5
3	90°	54,7	62,9	228,3	122,4
4	157,5°	-13,3	10,9	41,9	56,5
5	-135°	-42,0	-33,6	116,8	66,4
6	-90°	-47,8	-39,5	232,2	60,5
7	-45°	-25,4	98,9	346	198,9

*Foram obtidos do modo indicado para a tabela 6.2.

➤ **Solução representando as tensões residuais por uma margem de incerteza nas medições em campo**

No tópico referente a este método de determinação dos esforços, foi recomendado que se medissem pontos nos domínios $[112,5^\circ, 180^\circ]$ e $[-67,5^\circ, -180^\circ]$. Foram escolhidos três valores (número mínimo necessário) dentro destes domínios na coluna de tensões longitudinais medidas, referentes às posições 67,5°, 157,5° e -135°. Os valores foram subtraídos de $\nu \frac{PD}{2t}$ e submetidos a uma análise combinatória, variando-se as tensões a que se somava ou subtraía o termo $0,1S_y$ (sendo $S_y=420\text{MPa}$), como mostrado no exemplo fornecido no item 6.4.1. Usando o Conjunto de matrizes B, os máximos valores absolutos encontrados para os esforços foram:

$$\begin{aligned} F_x &= 80 \text{ kN} \\ M_z &= -508 \text{ kN.m} \\ M_y &= 915 \text{ kN.m} \end{aligned}$$

E os médios foram:

$$\begin{aligned} F_x &= 65 \text{ kN} \\ M_z &= -268 \text{ kN.m} \\ M_y &= 656 \text{ kN.m} \end{aligned}$$

➤ **Solução ignorando a existência de tensões residuais**

Usando os sete valores de tensões longitudinais da tabela 6.4 no conjunto de matrizes A e aplicando o método de mínimos quadrados, tem-se:

$$\begin{aligned}F_x &= 63 \text{ kN} \\M_z &= -287 \text{ kN.m} \\M_y &= 564 \text{ kN.m}\end{aligned}$$

Usando dezesseis valores de tensões medidas e aplicando novamente o método de mínimos quadrados, os resultados foram:

$$\begin{aligned}F_x &= 58 \text{ kN} \\M_z &= -142 \text{ kN.m} \\M_y &= 611 \text{ kN.m}\end{aligned}$$

❖ **Comparação Entre os Métodos (X60)**

A tabela 6.5 tem conteúdo e considerações similares aos da tabela 6.3. Sua análise é válida para os resultados obtidos a partir das tensões medidas para o tubo API 5L X60.

Tabela 6.5. Comparação entre os erros obtidos para os diferentes métodos de determinação de esforços em relação aos valores exatos para o tubo X60

Método	F_x (kN)	M_z (kN.m)	M_y (kN.m)
	Erro	Erro	Erro
Simulado sem T.R.'s	60	-174	522
	0%	0%	0%
Ignorando a existência das TR's (com 7 pontos medidos)	63	-287	564
	5%	65%	8%
Ignorando a existência das TR's (com 16 pontos medidos)	58	-142	611
	-3%	-19%	17%
Tratando as TR's por uma margem de incerteza (valores máximos)	80	-508	915
	33%	192%	75%
Tratando as TR's por uma margem de incerteza (valores médios)	65	-268	656
	8%	54%	26%

Foram encontrados valores razoáveis para os esforços ignorando-se a parcela de tensões residuais nas tensões totais medidas, principalmente para F_x e M_y . Isso se deve aos baixos valores de tensões residuais na região medida. Os valores dos esforços encontrados não melhoraram quando se aumentou o número de medições, bem como no 2º caso para o tubo X46.

Quanto ao método de tratamento das tensões residuais como uma margem de incerteza nas tensões totais medidas, pode-se dizer que:

- Os valores máximos dos esforços ficaram muito aquém dos valores exatos. Apresentaram erros bem maiores do que os encontrados desconsiderando-se as tensões residuais.

- Os valores médios encontrados apresentaram erros próximos aos encontrados quando as tensões residuais foram ignoradas, à exceção do esforço M_y . Mas, os erros foram sempre para mais.

- Foi tentada a aplicação deste procedimento para mais pontos (usaram-se cinco). Os resultados obtidos para os esforços pioraram, mudando inclusive, o sinal do momento em z (M_z) encontrado. Isto, aliado ao fato dos valores máximos dos esforços terem sido muito ruins para ambas as tentativas, pode ser um indicativo de que a faixa de incerteza utilizada (80 MPa) foi alta, comparada à real variação dos valores de tensões nas regiões avaliadas.

6.6. Análise de Criticidade dos Perfis de Tensões Medidos

O interesse principal de uma análise de integridade estrutural é a identificação das situações críticas. Nesta seção, serão analisados os perfis de medição colocados no tópico 6.5, segundo as concepções definidas na seção 6.2.

6.6.1. Para as simulações relativas ao tubo API 5L X46

As curvas resultantes dos valores de tensões totais simuladas apresentados na tabela 6.2, estão representadas na figura 6.6.

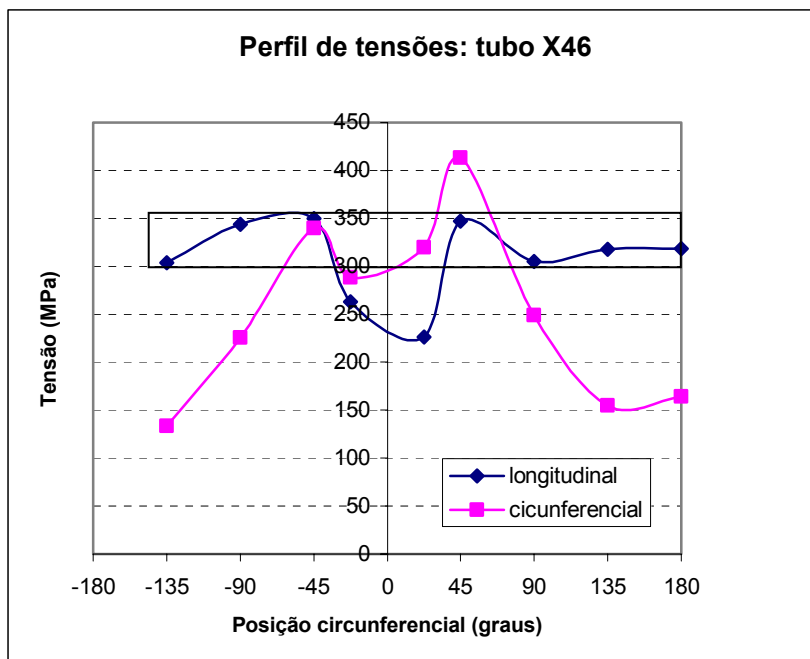


Figura 6.6. Perfis de tensões medidas na superfície do tubo X46: valores da tabela 6.2.

A figura mostra altos valores de tensões longitudinais trativas⁸ em praticamente todos os pontos medidos, sem que haja valores com sinais inversos ao longo da seção, que possam equilibrar os esforços por elas gerados. Com exceção da região próxima à solda, este perfil pode ser comparado com o da figura 6.2. Então, este caso deve ser encarado como crítico, pelas razões expostas no tópico 6.2.2. As tensões longitudinais trativas atuantes no tubo devem ser aliviadas (por exemplo, por escavações e novo aterramento) para que ele possa continuar operando.

6.6.2. Para as simulações relativas ao tubo API 5L X60

A figura 6.7 mostra os perfis de tensões resultantes dos valores de tensões apresentados na tabela 6.4.

⁸ Próximas à resistência ao escoamento, cujo valor medido para o tubo X46 analisado foi de 314 MPa.

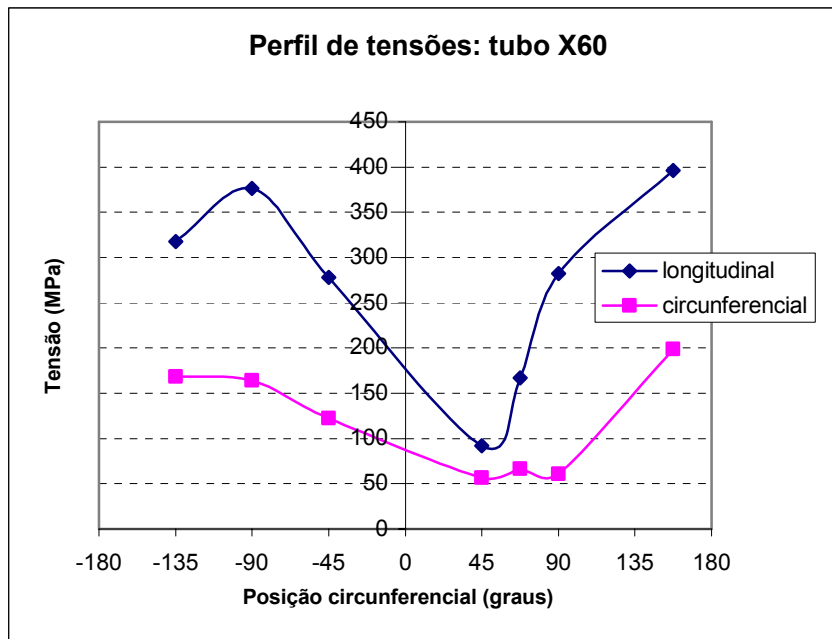


Figura 6.7. Perfis de tensões medidas na superfície do tubo X60: valores da tabela 6.4.

Os perfis de tensões medidas apresentados na figura 6.7, mostram alguns pontos de altas tensões longitudinais trativas, com valores próximos ao limite de escoamento do tubo, que é de 420 MPa. Porém, em outros pontos da seção, existem tensões de magnitudes bem menores. Se estas tensões menores não forem capazes de anular os esforços provenientes dos pontos de maior tensão, pelo menos deverão inibir suas ações, evitando a formação do colapso plástico completo na seção.

Pode ser notado também que, os pontos diametralmente opostos -135° e 45° apresentam grandes diferenças entre seus valores. Isto pode ser interpretado como a ação de um momento fletor agindo no tubo, já que as curvas de tensões residuais deste não explicam esse comportamento das tensões longitudinais nesses dois pontos.

A situação definida pela figura 6.7 é menos preocupante do que a colocada na figura 6.6. O duto pode continuar operando, mediante a realização de mais algumas medições para comprovar se as altas tensões realmente se restringem a pequenas regiões da seção.

Ainda que se estabeleçam metodologias para melhorar os resultados da determinação de esforços externos atuantes em um duto, separando suas tensões

das residuais de fabricação, não se pode garantir a acurácia dos resultados, pois os valores calculados para estes esforços são muito sensíveis às variações de tensões. A incerteza dos resultados calculados torna-se grande, a menos que se conheçam as tensões residuais efetivamente atuantes em cada um dos pontos medidos.

Mas, o conhecimento do comportamento e magnitudes das tensões residuais em tubos similares àqueles a serem analisados no campo permitirá uma avaliação melhorada das tensões totais medidas. Ainda que se meçam tensões muito altas no campo, se for sabido que grande parcela dessas tensões é devida às tensões residuais de fabricação, a situação poderá não ser tão preocupante.

As tensões residuais são auto-equilibrantes e o tubo só falhará quando as parcelas de tensões medidas referentes aos esforços de trabalho atingirem os limites admissíveis para o material do tubo. Por exemplo, no item 6.6.1, caso a magnitude das tensões residuais medidas no tubo X46 fossem levadas em conta ponto a ponto, o julgamento da situação poderia ser diferente, porque as tensões residuais longitudinais neste tubo são altas na maior parte dos pontos medidos (figura 5.16). Reduzindo os valores das tensões totais, da ordem das tensões residuais, poderia ser notado que os valores de tensões referentes aos esforços externos, que são os que inspiram cuidados, estariam em patamares aceitáveis em relação ao limite de resistência do material do tubo.